6П

УДК 004.896

В.Г. Писаренко, Ю.В. Писаренко, Е.Ю. Мелкумян, А.С. Коваль
Институт кибернетики им. В.М. Глушкова НАН Украины, г. Киев, Украина
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина
jvpisarenko@gmail.com

Применение робототехники для обследования шахты после обвала

Проанализированы реальные задачи, высокоактуальные для повышения безопасности в отечественной угледобывающей отрасли промышленности с точки зрения поддержки горноспасательных работ средствами интеллектуализированной робототехники. Рассмотрены некоторые вопросы создания программно-аппаратной части моделирования и функционирования роботов для обследования завалов и аварийно-опасных участков в шахтах.

Введение

После известных событий 1991 года угольная отрасль Украины практически не получала ощутимых инвестиций по модернизации используемых технологий конца XX века. Специалисты считают, что именно это является одной из главных причин непрерывного роста аварийности на отечественных шахтах. Анализ показывает [1], что для выхода отечественной угольной отрасли из нынешнего критического состояния одной из наиболее актуальных проблем является создание высокотехнологических средств предотвращения аварий, включая создание и применение на шахтах интеллектуализированных роботов-разведчиков (ИРР) для контроля текущего состояния аварийноопасных участков и для участия в горноспасательных работах после аварий. Создание ИРР актуально для угледобывающей отрасли не только Украины, но и для других стран ближнего и дальнего зарубежья.

Постановка задачи. В связи с актуальностью создания ИРР для угледобывающей отрасли авторы на ряде совещаний со специалистами горноспасательного дела (включая ведущих специалистов НИИ горноспасательного дела и пожарной безопасности Минуглепрома Украины) и ведущими инженерами шахты им. А.Ф. Засядько проанализировали реальные задачи, высокоактуальные для повышения безопасности в отечественной угледобывающей отрасли промышленности с точки зрения поддержки горноспасательных работ средствами интеллектуализированной робототехники.

Требования к создаваемой робототехнике

По результатам совещания были приняты следующие общие требования к создаваемой робототехнике (условное название: «Горноспасательный интеллектуализированный робот-разведчик (ГОСИР)»):

1 Основные модули робота-разведчика ГОСИР:

1.1 Шасси, двигатель с пневмоприводом для исключения электрооборудования, несущего риск электроискрения, что может привести ко взрыву в метанопылеугольной атмосфере шахты.

1.2 Набор бортовых сенсоров для контроля шахтной атмосферы (метан, углекислый газ, угольная пыль, кислород, угарный газ, влажность).

1.3 Комплекс дальномеров для обследования и создания 3D-модели обследуемого шахтного завала.

1.4 Бортовой навигационный комплекс, обеспечивающий роботу возможность двигаться автономно и в соответствии с поставленной программой (маршрутным заданием) при использовании данных 3D-мониторинга (пункт 1.3).

1.5 Бортовой радиотехнический комплекс связи, обеспечивающий радиосвязь с удаленным оператором для консультаций в нестандартных ситуациях.

1.6 Бортовой манипулятор для выполнения в необходимых случаях работ по созданию узких технологических проходов или «отверстий» в завалах пород путем бурения для последующего оказания помощи горнякам, застигнутым обвалом, включая передачу медикаментов, средств связи, продуктов питания, воды, пакетов индивидуального или коллективного спасения и др. экстренной помощи. Манипулятор должен обеспечивать также возможность выполнения операций по захвату объектов ограниченного веса (пробы пород, компоненты разрушенного оборудования и др.).

2 Функции бортового программно-аппаратного комплекса:

2.1 Контроль шахтной атмосферы.

2.2 Распознавание исходной полученной бортовыми сенсорами мониторинговой информации.

2.3 Принятие целесообразных решений в автономном режиме.

2.4 Формирование 3D-поверхности обследуемой зоны.

2.5 Нанесение на 3D-поверхность обследуемой зоны препятствий, узких и непроходимых роботом зон.

2.6 Формирование файла состояния шахтной атмосферы с координатной привязкой к стартовой неподвижной системе координат.

Требования к ГОСИР первого поколения (проект ГОСИР-1) включают обеспечение функций 2.1 и 2.2, связь с оператором происходит по радио или в отдельных случаях – по кабелю. Технические решения отдельных элементов ГОСИР первого поколения приняты в соответствии с пунктами 1 – 1.6.

Построение математической модели по данным 3D-мониторинга предлагается осуществить с помощью 4-лучевого лазерного дальномера (рис. 1), описанного в нашей работе [2].

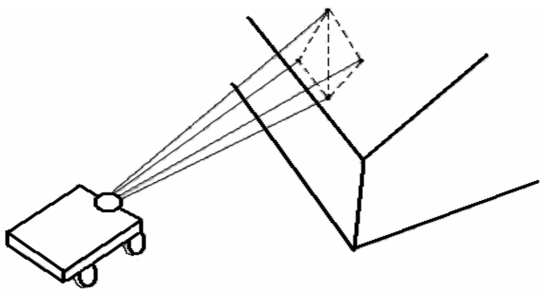


Рисунок 1 – По положению следов четырех зондирующих лучей на удаленном препятствии (зарегистрированных бортовой камерой на фото/видеоизображении) можно вычислить удаленность и ориентацию по двум углам участка препятствия, аппроксимированного двумя треугольниками, изображенными пунктирными линиями

Программно-аппаратная часть интерпретации достаточно подробно описана в нашей работе [3]. Исходный файл данных (Dot_3D), который получается в результате измерения расстояний до препятствий дальномерами, записывается в память бортового

компьютера. Файл Dot_3D далее используется специальной программой PRIZM_3D, которая аппроксимирует тем или иным математическим агрегатом точечно заданную поверхность и формирует 3D-образ обследуемого помещения. Программа OPTIM_TRAJ формирует совместно с программой PRIZM_3D варианты оптимального маршрута робота с учетом наличия препятствий и узких мест.

Варианты сплайнов для движения самого робота можно получить, используя программу PRIZM_3D, моделирующую обследуемую поверхность конечными элементами. В большинстве случаев достаточно получить аппроксимацию в форме кусочно-плоской поверхности, составленной из множества соприкасающихся призм или как пересечение пространственных плоскостей.

В более сложном случае (например, при выполнении отверстий в породе специальным бортовым буром из пункта 1.6 требований) необходимо воспользоваться программой 3D_SPLINE, обеспечивающей построение непрерывной вместе с первой производной поверхности, основанной на трехмерной сплайн-интерполяции.

Для разработки типовых ИРР рассмотрены методы построения траектории мобильного робота с механическим многозвенным манипулятором для подбора оптимальных параметров звеньев на уровне компьютерного имитационного моделирования для задач функционирования в ограниченных пространственных условиях шахты. Решение этой задачи является актуальным для проблемы разведки в шахтном забое или проведения ремонтных работ в узком помещении инженерного сооружения [1]. Типичный пример обследования: разведка интерьера инженерного сооружения после аварии, когда возникает дополнительная проблема обследования принципиального изменения интерьера (как результат аварии) сжатого рабочего помещения при неизвестной новой конфигурации возможных проходов.

Таким образом, ГОСИР поставлена многокомпонентная задача, состоящая из взаимосвязанных частичных задач:

1) пройти внутрь шахты;

2) построить 3D-карту «обновленной» местности;

3) правильно выгнуться нужными шарнирами манипулятора;

4) найти и захватить (или включить/выключить) нужный предмет.

Целью имитационного моделирования является расчет ряда типичных примеров-ситуаций для выбора количества, длины звеньев и углов ориентации системы управления манипулятора и для обучения пользователей работе с устройством.

Имитационное моделирование предусматривает решение таких задач:

– поиск оптимальной длины сегмента манипулятора;

– определение траектории захвата манипулятора для известной заранее конфигурации туннеля. При перемещении звеньев манипулятора и его захвата следует придерживаться построенной траектории, проходящей в центре туннеля;

– реализация движения захвата манипулятора по построенной траектории при известной заранее конфигурации туннеля;

– реализация движения захвата манипулятора методом проверки столкновений сферы безопасности с поверхностями туннеля на каждом шаге. Если столкновение произошло, тогда осуществляется поворот звена манипулятора. Этот метод используется, когда конфигурация туннеля заранее не известна;

– определение углов шарниров на каждом шаге.

Далее описаны 2 метода построения пути манипулятора сквозь туннель, использующие кубические сплайны. Эта задача актуальна для движения конечного звена многозвенного манипулятора, который несет сенсоры в сжатом, узком пространстве, типа аварийного штрека шахты после обвала пород.

Методы построения траектории на основе кубических сплайнов

Метод 1. Классический.

Имеется матрица размерности *N*, заданы значения для *x* и *y* при *i = 0…N*. Имеем $h_k = x_k - x_{k-1}$ для $k = 1...N-1$. Для того чтобы найти значения функции, в виде которой строим сплайн: $S_{\Delta k} = ax^3 + bx^2 + cx + d$, где $k = 1...N-1$, выполним следующие действия:

1 Заполним матрицу размерности $N \times N$ значениями

$$\left[A_{ij}\right] = \begin{bmatrix} 2 & \lambda_0 & 0 & ... & 0 & 0 & 0 \\ \mu_1 & 2 & \lambda_1 & ... & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mu_2 & 2 & ... & 0 & 0 & 0 \\ ... & ... & ... & & ... & ... & ... \\ 0 & 0 & 0 & ... & 2 & \lambda_{N-2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & ... & \mu_{N-1} & 2 & \lambda_{N-1} \\ 0 & 0 & 0 & ... & 0 & \mu_N & 2 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $\lambda_j = h_{j+1}\left(h_j + h_{j+1}\right)^{-1}$, $\mu_j = h_j\left(h_j + h_{j+1}\right)^{-1}$, $i = \overline{0, N}$.

Для λ_0 и μ_N получить значения из данных формул невозможно.

2 Поскольку

$$\sum_{j=0}^{M} A_{ij} M_j = d_j, \; i = \overline{0, N}, \; A_{ij} \equiv A_{ij}\left(\lambda_0, \mu_N; N, \Delta\right), \quad (2)$$

находим значения для

$$d_k = \frac{6}{h_k + h_{k+1}}\left(\frac{y_{k+1} - y_k}{h_{k+1}} - \frac{y_k - y_{k-1}}{h_k}\right), \; k = 1...N-1. \quad (3)$$

Для равномерной сетки имеем:

$$d_k = \frac{3}{2}\frac{y_{k-1} - 2y_k + y_{k-1}}{h^2}. \quad (4)$$

3 Находим обратную матрицу A^{-1}.

4 Находим M_k, где $k = 1...N-1$.

Для этого перемножим матрицы: $M = A^{-1} \cdot D$, то есть:

$$M_k = \sum_{i=0}^{N-2} a_{k,j}^{-1} \cdot d_k. \quad (5)$$

5 Найдем M_0 и M_N по формуле:

$$M_j + \frac{2}{h_2 + h_3}\left(\frac{M_{j-1}h_j + M_j h_j}{6}\right) = \left(\frac{y_j - y_{j-1}}{h_j} + \frac{y_{j+1} - y_j}{h_{j+1}}\right)\cdot\left(\frac{-2}{h_2 + h_3}\right). \qquad (6)$$

Для M_0 берем $j = 1$, для M_N берем $j = N - 1$.

6 Находим коэффициенты необходимой нам функции на всех интервалах и строим сплайн:

$$S_{\Delta k} = ax^3 + bx^2 + cx + d \text{, где } k = 1 \ldots N - 1 \qquad (7)$$

Коэффициенты:

$$a = \frac{M_j - M_{j-1}}{6h_j}, \qquad (8)$$

$$b = \frac{M_{j-1}x_j - M_j x_{j-1}}{2h_j}, \qquad (9)$$

$$c = \frac{M_j x_{j-1}^2 - M_{j-1}x_j^2}{2h_j} + \frac{(M_{j-1} - M_j)h_j}{6} + \frac{y_j - y_{j-1}}{h_j}, \qquad (10)$$

$$d = \frac{M_{j-1}x_j^3 - M_j x_{j-1}^3}{6h_j} + \frac{(M_j x_{j-1} - M_{j-1}x_j)h_j}{6} + \frac{y_{j-1}x_j - y_j x_{j-1}}{h_j}. \qquad (11)$$

Иногда для построения гладкого сплайна достаточно использовать метод 2 [4].

Метод 2. Улучшенный метод 2.

Доказано [5], что для $|\lambda_0| < 2$ и $|\mu_N| < 2$ решение системы (2):

$$\sum_{j=0}^{M} A_{ij} M_j = d_j \text{ , } i = \overline{0, N} \text{ ,}$$
$$A_{ij} \equiv A_{ij}(\lambda_0, \mu_N; N, \Delta),$$

существует и оно единственно, и при этом трехдиагональная матрица $A \equiv A(\lambda_0, \mu_N; N, \Delta)$ неособенная, то есть имеет единственную обратную матрицу A^{-1}. $\{h_i\}_1^N$ и вычисление моментов $\{M_j\}_0^N$ осуществляется эффективно с помощью компьютера методом прогонки. Вместе с тем для изучения разрешимости поставленной задачи сглаживания выпуклыми кубическими сплайнами при оптимизации концевых условий необходимо получить явное представление для всех элементов матрицы A^{-1} как функций переменных $\{y_i\}_1^N$, $\{h_i\}_1^N$ при заданном N. В работе [4] изложен и обоснован один эффективный метод, с помощью которого все элементы матрицы A^{-1} размерности $N \times N$ представлены через элементы аналогичных матриц меньших размерностей $N_1 \times N_1$ и $N_2 \times N_2$, причем $N_1 + N_2 = N + 1$. Последовательное применение этого метода несколько раз позволяет свести задачу об обращении трехдиагональной матрицы A высокой размерности к простой задаче об обращении одной либо двух матриц малой размерности.

Критерии качества

Критерии качества моделирования некоторой гладкой кривой только по значениям этой кривой в конечном числе узлов интерполяции $y_i = f(x_i)$ таковы:

1. Обеспечение минимума: $\int_{x_0}^{x_N} f''(x)dx \xrightarrow[\text{var}]{} \min$ при всех вариациях N и h_i;

2. Для задачи интерполяции некоторой «идеальной кривой» набора $f_j(x)$ на сетке $\omega: x_0 < x_1 < ... < x_N$ так выбрать свой интерполяционный агрегат (кубический сплайн того или иного автора), чтобы при построении с помощью выбранного метода «своей» модели функции $F(x)$ было выполнено следующее условие:

$$\left\| f_j(x) - F(x) \right\|_{C^l} \le \varepsilon_l ,$$

где l – степень гладкости, ε_l – заданная достаточно малая величина требуемой точности аппроксимации, C^l – класс кривой, непрерывной в l-й производной, $l = 0, 1, 2$.

Сформулировано эмпирическое правило:

1) для моделируемой кривой получить достоверные значения $y_i = f(x_i)$ в наибольшем количестве точек $N+1$ из возможного числа;

2) получить некоторую обучающую выборку в форме некоторого количества «идеальных» кривых, пригодных для данной предметной области.

То есть k штук гладких кривых, описываемых аналитическими функциями на всех внутренних отрезках интерполяционной сетки $\omega: x_0 < x_1 < ... < x_N$.

Задачей интерполяции заданной гладкой кривой (то есть из класса C^1 – непрерывной с 1-й производной) называется задача построения некоторой функции из класса C^1 при выполнении условия $y_i = f(x_i)$, где значения y_i в узлах сетки $\omega: x_0 < x_1 < ... < x_N$ считаются только заданными.

Выводы

В работе проанализированы реальные задачи, актуальные для повышения безопасности в отечественной угледобывающей отрасли промышленности путем применения средств интеллектуализированной робототехники для поддержки горноспасательных работ. Рассмотрены некоторые вопросы создания программно-аппаратной части моделирования и функционирования роботов для обследования завалов и аварийно-опасных участков в шахтах.

Приведено сравнение двух методов для построения пути многозвенного манипулятора сквозь туннель, использующие кубические сплайны. Методы являются элементом САПР для создания многозвенных роботов – манипуляторов, способных за счет комбинированного взаимодействия звеньев во времени и пространстве двигаться вдоль траектории, обеспечивая минимальное отклонение от оптимальной идеально гладкой кривой.

Для аппроксимации полученных сплайн-функций с целью построения траектории манипулятора интеллектуального робота следует использовать второй усовершенствованный метод. Он имеет уменьшенное количество операций расчета без

снижения точности за счет сокращения количества шагов прогонки матрицы в два раза. Метод позволяет записать алгоритм управления углами шарниров манипулятора на бортовой компьютер системы управления интеллектуальным роботом.

Литература

1. Писаренко В.Г. Актуальные направления развития интеллектуализированной робототехники для снижения аварийности на шахтах / В.Г. Писаренко, Ю.В. Писаренко // Искусственный интеллект. – 2009. – № 3. – С. 308-316.
2. Information models for robotics system with intellectual sensor and self-organization / V. Pisarenko, I. Varava, J. Pisarenko, V. Prokopchuk // KDS Varna (Bulgaria). – Vol. 2 : FOI-commerce. – Sophia, 2005.
3. Писаренко В.Г. Програмне забезпечення підбору параметрів маніпулятору / В.Г. Писаренко, Ю.В. Писаренко, К.Ю. Мелкумян, О.С. Коваль // Сб. АСАУ (НТУУ «КПІ»). – 2010. – № 17(37). (В печати.)
4. Писаренко В.Г. Об интерполяции со сглаживанием выпуклыми кубическими сплайнами при оптимизации концевых условий / В.Г. Писаренко // Сборник научных трудов «Физика и механика нелинейных явлений». – Киев : Наукова думка, 1979. – С. 115-131.
5. Алберг Дж. Теория сплайнов и ее приложения / Алберг Дж., Нельсон Э., Уолш Дж. – М. : Мир, 1972. – 316 с.

В.Г. Писаренко, Ю.В. Писаренко, К.Ю. Мелкумян, О.С. Коваль

Використання робототехніки для обстеження шахти після обвалу

Проаналізовано реальні задачі, високоактуальні для підвищення безпеки у вітчизняній вуглевидобувній галузі промисловості з погляду підтримки гірничорятувальних робіт засобами інтелектуалізованої робототехніки. Розглянуто деякі питання створення програмно-апаратної частини моделювання і функціонування роботів для обстеження завалів і аварійно-небезпечних ділянок у шахтах.

V. Pisarenko, Ju.Pisarenko, C. Melkumyan, A. Koval

The Application of Robotics for Inspection of Mine After Collapse

The real high-actual tasks for the increase of safety in domestic of coal industry from point of support of mine-rescue works facilities intellectual robotics were analyzed. Some questions of hard- and software creation of robot’s design and functioning for the inspection of obstructions and emergency-dangerous areas in mines are considered.

Статья поступила в редакцию 29.06.2010.